

Caracterització del recurs geotèrmic per al Centre Esportiu Municipal de Can Caralleu

Clara Armengol Jiménez

Tutor: David Pérez Hidalgo

UAB Geologia, 4rt curs

13.06.2014

Índex

Resum	2
Resumen	2
Abstract	3
Introducció	3
Objectius	3
Energia geotèrmica de molt baixa entalpia	4
Materials i metodologia	6
Caracterització de la instal·lació	6
Resultats obtinguts e interpretació	7
Caracterització de la instal·lació	10
Conclusions	17
Agraïments	18
Bibliografia	18
Annexes	20
Annex 1: L'energia geotèrmica	20
Annex 2: Mapa de situació general	32
Annex 3: Plànol de situació dels sondejos	33
Annex 4: Talls geotècnics	34

Resum

L'energia geotèrmica de molt baixa entalpia és un recurs energètic renovable poc aprofitat actualment.

En aquest treball es mostra l'aprofitament d'aquest recurs per a fer-ne ús al Centre Esportiu Municipal de Can Caralleu, al barri de Sarrià, Barcelona. A partir de les característiques del subsòl i de les necessitats tèrmiques del centre es realitza un estudi de com hauria de ser la instal·lació geotèrmica.

S'ha determinat una instal·lació de circuit tancat, amb bomba de calor geotèrmica, de la qual s'han calculat les potències i la longitud. També s'ha realitzat el dimensionat de la instal·lació, amb el disseny de varis models que representen les diferents opcions de col·locació dels sondejos i les seves profunditats. Finalment, s'ha calculat el consum anual de la bomba i el seu cost, també s'ha calculat el cost de la instal·lació.

Dels tres models realitzats, només n'hi ha un que es podria aplicar actualment per a la realització de la instal·lació d'energia geotèrmica, els altres resultarien impossibles per la situació dels sondejos sota zones ja edificades. Tot i que el cost de la instal·lació resultaria car, sortiria a compte realitzar-la ja que el consum i els costos anuals serien considerablement menors que els actuals.

Resumen

La energía geotérmica de muy baja entalpia es un recurso energético renovable poco aprovechado actualmente.

En este trabajo se muestra el aprovechamiento de este recurso para su uso en el Centre Esportiu Municipal de Can Caralleu, en el barrio de Sarrià, Barcelona. A partir de las características del subsuelo y de las necesidades térmicas del centro se realiza un estudio de cómo debería ser la instalación geotérmica.

Se ha determinado una instalación de circuito cerrado, con bomba de calor geotérmica, de la cual se han calculado las potencias y la longitud. También se ha realizado el dimensionado de la instalación, con el diseño de varios modelos que representan las diferentes opciones de colocación de los sondeos y sus profundidades. Finalmente, se ha calculado el consumo anual de la bomba y su coste, también se ha calculado el coste de la instalación.

De los tres modelos realizados, sólo hay uno que se podría aplicar actualmente para la realización de la instalación de energía geotérmica, los otros resultarían imposible por la situación de los sondeos bajo zonas ya edificadas. Aunque el coste de la instalación resultaría caro, saldría a cuenta realizarla ya que el consumo y los costes anuales serian considerablemente menores que los actuales.

Abstract

At the moment, the very low enthalpy geothermal energy is used as a short renewable energetic resource.

This work will illustrate the use of this energy source by its application at the Centre Esportiu Municipal de Can Caralleu, in Sarrià's district, Barcelona. From the subsurface features and the thermal requirements of the center, a study has been conducted of how the geothermal installation should be performed.

A closed-loop system installation has been determined, with a geothermal heat pump, and its powers and length has been calculated as well. Furthermore, the dimensioned of the installation has been premeditated with the design of some models that represent the different options of the borehole placement and its depths. Finally, the annual consumption of the pump and its costs have been calculated, the installation costs have been calculated too.

From the three models done, only one could be applied at present to do the geothermal energy installation, the others would be impossible to do as the situation of the boreholes under already built areas. Although the installation costs would be expensive, it would be a beneficial project to do as the consumption and the annual costs would turn out to be considerably less than the present ones.

Introducció

Objectius

Aquest treball es basa en l'estudi de l'energia geotèrmica, concretament en l'energia geotèrmica de molt baixa entalpia i en l'aprofitament d'aquesta.

Pretén conèixer una mica més aquest tipus d'energia renovable, actualment no massa utilitzada, i mostrar com pot ser possible treure'n profit, encara que sigui a petita escala.

Per fer-ho, s'ha escollit un projecte que pugui fer ús d'aquest recurs i el qual no l'utilitzi actualment, amb la finalitat de poder fer la caracterització d'aquest pel seu possible aprofitament. El cas a estudiar és un projecte ja en actiu des de fa uns anys, el Centre Esportiu Municipal de Can Caralleu, situat al barri de Sarrià, Barcelona.

L'objectiu del treball és conèixer l'energia geotèrmica a grans trets i concretament la de molt baixa entalpia. A partir d'aquí, realitzar un estudi del projecte en el que serà necessari conèixer tant les necessitats tèrmiques de l'edifici com les característiques del subsòl sota aquest. Posteriorment, es farà la caracterització del recurs i l'estudi de

la instal·lació amb els càlculs pertinents. Per últim, es farà un càlcul aproximat del cost econòmic de la instal·lació.

Per la realització del treball caldrà tant la recerca bibliogràfica d'informació com l'experimentació amb aquesta.

Energia geotèrmica de molt baixa entalpia

En un sentit ampli, l'energia geotèrmica és l'energia calorífica que la Terra transmet des de les seves capes internes fins les capes més externes de l'escorça terrestre. Aquesta energia engloba la calor emmagatzemada en roques, sòls i aigües subterrànies, a qualsevol temperatura, profunditat i procedència però no engloba la calor continguda en masses d'aigua superficials, continentals o marines.

Dins l'energia geotèrmica es pot fer una classificació segons el nivell tèrmic o entalpia d'aquesta, en què s'obté: energia geotèrmica d'alta entalpia, de mitja entalpia, de baixa entalpia o de **molt baixa entalpia**.

Al parlar de la fracció de l'energia geotèrmica que pot ser aprofitada de manera viable es parla de recurs.

Així doncs, els recursos geotèrmics de molt baixa entalpia són els que tenen temperatures inferiors a 30 °C i normalment les temperatures d'aquests recursos s'acosten a la mitja anual del lloc on es capten. Es tracta de l'energia tèrmica emmagatzemada en les aigües subterrànies i en el subsòl poc profund (menys de 200 m). A partir dels 8-10 m de profunditat i fins els 100-200 m, la temperatura del terreny es manté pràcticament estable durant tot l'any degut a l'estabilitat tèrmica del subsòl davant l'oscil·lació estacional de l'ambient, i a partir d'aquí la temperatura va augmentant segons el gradient geotèrmic (3 °C cada 100 m), aquesta estabilitat és conseqüència de la transmissió de calor cap a les zones més externes de l'escorça. Se'n fa un ús directe de la calor: aport energètic a sistemes de ventilació, calefacció i refrigeració de locals i/o processos, amb o sense bomba de calor.

Al ser un recurs que es troba difós per tota la superfície de la Terra, quan es parla dels recursos geotèrmics de molt baixa entalpia no s'aplica el terme jaciment al fer referència de l'espai físic a l'interior de l'escorça on es troba, cosa que si que es faria en els altres tipus de recursos.

L'aprofitament que se'n treu d'aquests tipus de recursos consisteix en l'ús directe de la calor. Les temperatures utilitzades en el cas dels recursos de molt baixa temperatura, o també anomenats somers, per fer-ne un ús directe de la calor són entre 15 i 20 °C, s'inclouen també els aquífers convencionals.

Segons l'accessibilitat al recurs geotèrmic es faran servir diferents tecnologies pel seu aprofitament, cosa que condiciona també el tipus de sistema utilitzat, el qual variarà segons la manera de transportar la calor. En els **sistemes oberts** la mateixa aigua

extreta de l'aquífer és la transportadora de la calor mentre que en els **sistemes tancats** s'utilitza un fluid, que sol ser aigua amb algun additiu, que és el que capta la calor del subsòl i la transporta. Es podria afegir un tercer tipus, en el que hi ha una diferenciació entre el fluid transportador de la calor i l'aigua subterrània però no hi ha cap mena de barrera que separi un de l'altre.

Així doncs, les tecnologies utilitzades en la geotèrmia somera són dues: la bomba de calor geotèrmica, la més utilitzada, i l'emmagatzematge subterrani d'energia tèrmica.

La **bomba de calor geotèrmica**, o bomba per calor de font terrestre (*GHP: Geothermal Heat Pump*), utilitza una bomba que extrau la calor del terreny per la seva posterior utilització en sistemes de calefacció. Aquesta bomba tant pot escalfar com refrigerar o fins i tot proporcionar aigua calenta sanitària. En la majoria de casos és la única tecnologia que pot aprofitar el recurs. Pot fer servir tant sistemes oberts com sistemes tancats.

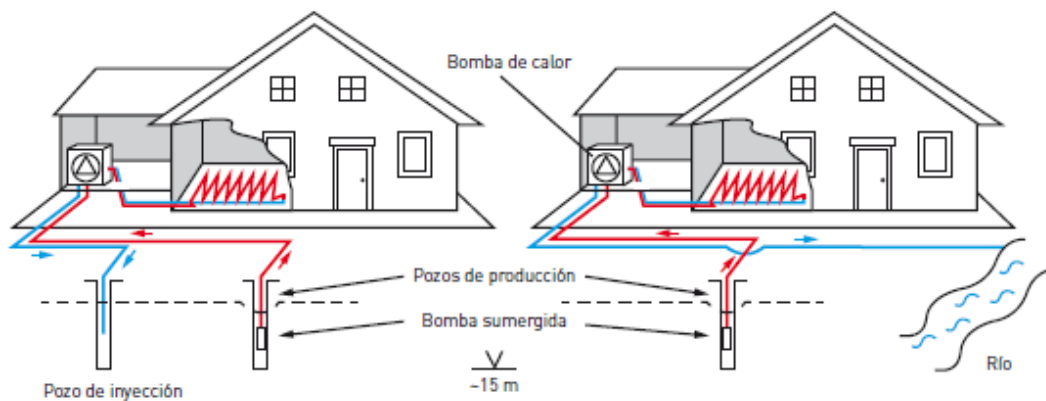


Figura 1.- Diagrames de funcionament d'una bomba de calor geotèrmica amb sondejos de captació d'aigua (sistema obert). Font: LLOPIS TRILLO, G.; RODRIGO ANGULO, V. *Guía de la Energía Geotérmica. Comunidad de Madrid. 2008.*

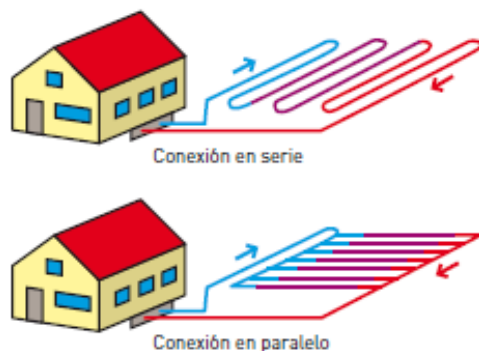


Figura 2.- Sistema tancat amb intercanviador de calor horitzontal. Font: MANDS, E.; SANNER, B. *Shallow Geothermal Energy. UBeG GbR, Zum Boden 6, D-35580 Wetzlar.*

L' **emmagatzematge subterrani d'energia tèrmica** (*UTES: Underground Thermal Energy Storage*) consisteix en l'emmagatzematge subterrani de calor, fred o ambdós. També utilitza tant sistemes oberts, emmagatzematge en aquífers (*ATES: Aquifer*

Thermal Energy Storage), com sistemes tancats, emmagatzematge en perforacions (BTES: Borehole Thermal Energy Storage).

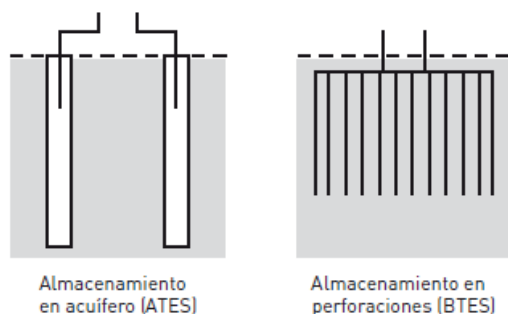


Figura 3.- Sistemes d'emmagatzematge subterrani de la calor geotèrmica. Font: MANDS, E.; SANNER, B. Geothermal Heat Pumps. UBeG GbR, Zum Boden 6, D-35580 Wetzlar.

Per a més informació consultar l'Annex 1.

Materials i metodologia

Per a conèixer l'energia geotèrmica s'ha realitzat recerca bibliogràfica.

Pel que fa a l'estudi del projecte ha sigut necessari conèixer tant l'estructura, extensió i necessitats tèrmiques del centre com la seva situació geogràfica, geològica i les característiques del subsòl sota aquest.

S'ha recorregut al mateix CEM Can Caralleu per tal d'obtenir certa informació del centre, proporcionada pel tècnic de manteniment.

Per conèixer les característiques geològiques de la zona s'han consultat mapes geològics. També s'ha contactat amb l'arquitecte del CEM Can Caralleu, que ha proporcionat un estudi geotècnic de la zona per tal de conèixer les característiques del subsòl sota el centre.

Per realitzar els càlculs dels costos econòmics s'ha consultat a diverses empreses i pàgines web de perforació i/o instal·lació d'energia geotèrmica.

Caracterització de la instal·lació

Per fer una bona caracterització de la instal·lació geotèrmica s'ha seguit una sèrie de passos. A continuació es mostra pas per pas tot el que s'ha fet per determinar com seria la instal·lació així com les fórmules utilitzades (extretes de: TECNOLOGÍA Y RECURSOS DE LA TIERRA, S.A.: SANCHEZ, J., SANZ, L., OCAÑA, L. *Evaluación del potencial de energía geotérmica. Estudio Técnico PER 2011-2020*. Madrid, 2011), i els costos econòmics.

1) Determinació de la càrrega tèrmica del centre.

2) Caracterització de la potència de la bomba de calor geotèrmica a partir del consum anual i del factor de capacitat (FC).

$$\text{Potència}_{\text{BCG}} = \frac{\text{Demanda anual (kWh/any)}}{\text{FC} * 8.760(\text{h/any})}$$

3) Càlcul de la longitud de la sonda de captació geotèrmica.

En base a la norma UNE-EN 14511-3:2012, que determina les equacions pel càlcul.

$$\text{Potència evaporador}_{\text{terreny}} = \frac{[\text{Potència}_{\text{BCG}} * (\text{COP} - 1)]}{\text{COP}}$$

$$\text{Longitud}_{\text{sonda}} = \frac{\text{Potència evaporador}_{\text{terreny}}}{\text{Potencial tèrmic}_{\text{terreny}}}$$

4) Dimensionat de la instal·lació. Situació dels sondejos i profunditats.

$$\text{Profunditat sondeig} = \frac{\text{Longitud sonda}}{\text{Num. sondejos}}$$

5) Càlcul del consum elèctric anual de la bomba de calor.

$$\text{Consum anual} = \text{Potència elèctrica dispositiu} * \text{hrs funcionament/any}$$

6) Càlcul del cost econòmic

- Cost del consum de la bomba de calor.
- Cost de les perforacions dels sondejos.
- Cost de la sonda geotèrmica.
- Cost total de la instal·lació.

Resultats obtinguts e interpretació

A continuació es mostra tota la informació i resultats obtinguts així com les fonts d'on s'ha extret.

El projecte a estudiar és el CEM Can Caralleu (Centre Esportiu Municipal de Can Caralleu), situat al Carrer Esports 2-8, al barri de Sarrià, a Barcelona.

Consta d'una superfície de 31.000 m² amb una multitud de serveis: camp de futbol, camp de futbol sala, camp de futbol 7, 5 pistes de tennis, 3 pistes de pàdel, una pista d'atletisme, una sala de condicionament físic de 313 m², una sala de *spinning*, 3 sales d'activitats dirigides, una sala *indoor walking*, piscina coberta de 25x12,5 m, 2 piscines amb sostre retràctil, hidromassatge, 2 saunes, espai de benestar i salut, solàrium, pista poliesportiva, pista de mini-bàsquet, zona d'entrenament a l'aire lliure, zona d'escalada, 11 vestidors, pàrquing i cafeteria.

Geològicament, el terreny estudiat se situa a la unitat morfològica anomenada Pla de Barcelona, pròxim a la Serralada Litoral. Aquesta unitat està formada per materials quaternaris i limita al N i NW amb el massís del Tibidabo, al S amb el delta del riu Llobregat, a l'E amb el Mar i al NE amb el delta del riu Besòs.

En l'àrea d'estudi, els materials del quaternari del pla de Barcelona es troben sobre els materials del sòcol granític que conformen la base de la serralada de Collserola, extrem sud-oriental de la Serralada Litoral. Aquests materials quaternaris del Pla de Barcelona estan constituïts pel que s'anomena el "tricicle", una repetició de tres vegades d'un cicle d'argiles, llims i carbonat.

A la franja del peu de Collserola els materials quaternaris contenen abundants graves i sorres de quars i materials metamòrfics. Superficialment, algunes rieres han deixat formacions al·luvials de sorres i llims poc consolidats de gruix no superior a 10 m.

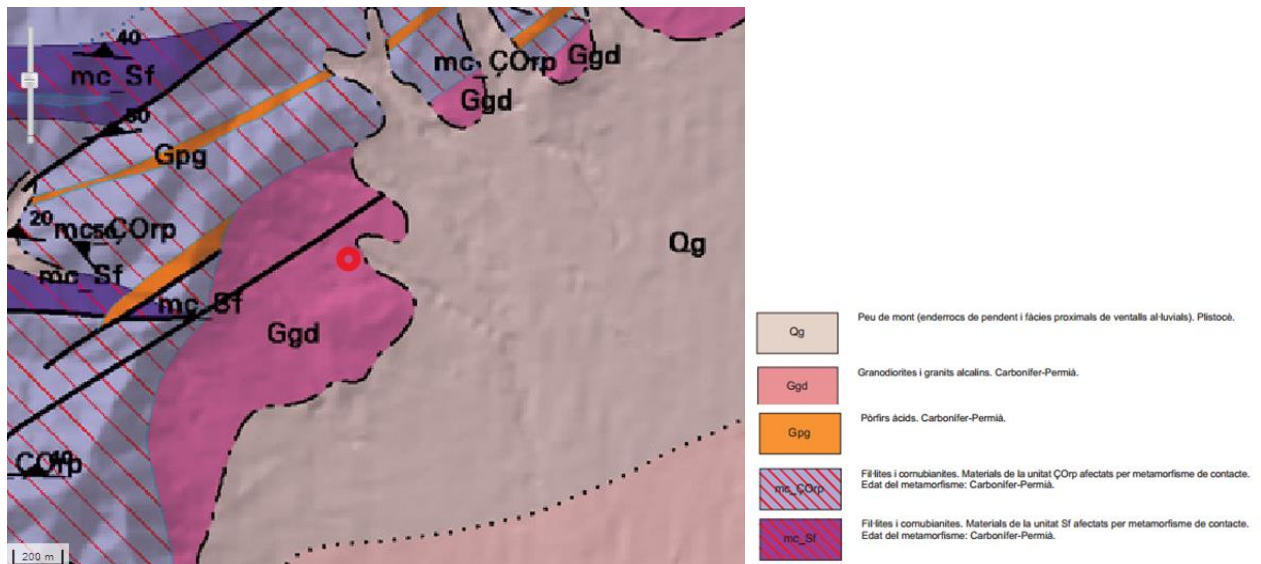


Figura 4.- Mapa geològic 1:50.000 de la zona, on es marca amb un punt vermell la situació del CEM Can Caralleu. Font: ICGC.

L'àrea d'estudi se situa al peu de la muntanya del Tibidabo i presenta un pendent general cap al SE amb una inclinació propera al 12%. Es troba en la confluència del Torrent de Can Caralleu i la Riera de Can Mora, les lleres de les quals estan reblertes de materials de replè.

A partir d'estudis geotècnics realitzats durant el 2003 i proporcionats per l'arquitecte de Can Caralleu, es coneixen les característiques del subsòl de sota el centre.

S'han realitzat 5 sondejos (numerats de forma correlativa a una campanya anterior) a les següents cotes i profunditats:

SONDEIG	PROFUNDITAT	COTA
S-13	9,5 m	173,5 m
S-14	6,0 m	173,5 m
S-15	12,5 m	173,5 m
S-16	9,0 m	173,5 m
S-17	15,0 m	172,0 m

Taula 1.- Dades de les diferents profunditats i cotes dels sondejos realitzats. Font: creació pròpia a partir de dades obtingudes a MATAS, S. Projecte d'execució del poliesportiu municipal Can Caralleu al c/Esports 2-8, Barcelona. Annex 2. Estudis geotècnics. (2003).

A partir d'aquests sondejos es van distingir tres capes anomenades R, A i B.

- **Capa R:** Es troba a tota la superfície del terreny estudiat i té un gruix variable d'entre 1,6 m (sondeig S-16) i 6,0 m (sondeig S-13). Es disposa reblint la topografia original i la seva morfologia s'adapta al relleu excavat per les rieres tot i que cal dir que és una zona on s'han realitzat extraccions de terres.

Són terres de reompliment antròpic, de composició heterogènia, formades per sorres de granit sense empaquetar amb matriu argilosa o llimosa de color marró fosc. Barrejats amb aquests també hi trobem restes de runa, graves de gra groller i restes de matèria vegetal i arrels.

Són materials de naturalesa heterogènia, sense consolidar i de resistència baixa.
- **Capa A:** Està composta pels materials quaternaris, formats principalment per argiles de color marró rogenc amb sorres i graves de pissarra i quars. Aquestes es barregen amb una fracció de llims que es reparteix de forma irregular, acumulant-se al sostre de la capa, amb una coloració marro més pàl·lida, i en nivells lenticulars més profunds. També presenten nòduls heteromètrics i petits nivells de carbonats, de color blanquinós, durs i de bona continuïtat lateral.

Aquesta capa, situada sota la capa de replè (capa R), té un gruix molt variable ja que depèn de la posició del sòcol granític que s'enfonsa cap a l'E i NE, i del gruix de replè de la llera de la riera. Així doncs, augmenta cap al N, assolint gruixos de més de 16 m (sondejos S-15 i S-16) i disminueix cap al S, fins a tenir 2-3 m (sondejos S-1, S-2, S-3 i S-4).

Són materials cohesius, mitjanament consolidats en superfície i ben consolidats en profunditat, de bona resistència, plasticitat baixa a mitja i humitat baixa a mitja.

El contingut inapreciable de sulfats solubles fa que l'agressivitat d'aquets sòl al formigó sigui pràcticament nul·la.

- **Capa B:** S'ha trobat als sondejos de la perifèria del terreny estudiat (S-1, S-2, S-3, S-4, S-5, S-13 i S-17) a profunditats d'entre 5 i 17 m tot i que per dades de geologia regional se sap que supera els 100 m. El sostre d'aquesta capa s'enfonsa cap al NE.

És la capa corresponent al sòcol paleozoic, format per un granit de gra groller i de color marró grisós. En superfície apareix alterat i a mesura que augmenta la profunditat també ho fa el seu grau de duresa alhora que disminueix el grau d'alteració.

És una roca molt dura, d'alta resistència, de plasticitat nul·la i baixa humitat. També presenta un contingut en sulfats solubles inapreciable.

Paràmetres	Capa R	Capa A	Capa B
Cohesió aparent Kg/cm ²	0,00	0,19	0,35
Densitat mitja T/m ³	1,80	2,05	2,15
Angle de fregament intern	24°	27°	31°

Taula 2.- Dades dels diferents paràmetres de les 3 capes diferenciades (R, A i B). Font: MATAS, S. Projecte d'execució del poliesportiu municipal Can Caralleu al c/Esports 2-8, Barcelona. Annex 2. Estudis geotècnics. (2003).

En l'anterior campanya es va localitzar un nivell d'aigua a la base de la capa R, a la zona dels sondejos S-1, S-3 i S-4. S'interpreta com a aigües d'infiltració superficial i fugues d'una canalització enterrada que recull l'aigua d'una mina o font i, per tant, no es tindrà en compte en aquest estudi.

Caracterització de la instal·lació

Els resultats e interpretació dels càlculs pertanyents a la instal·lació geotèrmica són els següents:

1) Determinació de la càrrega tèrmica del centre.

A partir de la informació que ha proporcionat el tècnic de manteniment del CEM Can Caralleu se sap que el consum de gas a Can Caralleu durant el 2013 va ser de 243.284 m³, és a dir 2.821.550 kWh, el que va representar un cost de 170.084 €. Amb aquest gas s'alimenten unes calderes per: escalfament de piscines, ACS (Aigua Calenta Sanitària) i climatització.

2) Caracterització de la potència de la bomba de calor geotèrmica a partir del consum anual i del factor de capacitat (FC).

S'ha decidit realitzar una instal·lació amb bomba geotèrmica utilitzant un sistema tancat, ja que en aquest cas l'energia geotèrmica es troba emmagatzemada al subsòl i no en un aqüífer.

El factor de capacitat representa el percentatge equivalent d'hores de funcionament anual a plena càrrega d'un determinat tipus d'instal·lació. Per a aquest cas, en el que es farà servir una bomba de calor geotèrmica, el FC considerat és de 0,19 (valor obtingut a: TECNOLOGÍA Y RECURSOS DE LA TIERRA, S.A.: SANCHEZ, J., SANZ, L., OCAÑA, L. *Evaluación del potencial de energía geotérmica. Estudio Técnico PER 2011-2020*. Madrid, 2011).

Així doncs, amb les dades de consum de gas anual i el FC, es pot calcular la potència que ha de tenir la bomba de calor geotèrmica que es faci servir en la instal·lació.

$$P_{BCG} = \frac{2.821.550 \text{ kWh/any}}{0,19 * 8.760 \text{ h/any}} = 1.695,23 \text{ kW}$$

S'hauria de separar la potència destinada a refrigeració i la destinada a calefacció però en aquest cas, per simplificar els càlculs, es farà de manera general i es calcularà tot junt.

A partir de la potència obtinguda cal determinar el COP (*Coeficient Of Performance* o de rendiment) de la bomba que s'utilitzaria. Es farà servir com a model el cas de l'Hospital de Mollet, que té una extensió semblant a la del projecte treballat i que també fa servir aquest recurs d'una manera molt semblant, usant bombes de calor. Aquest hospital cobreix potències de 1.200 kW per calefacció i 1.000 kW per refrigeració amb dues bombes geotèrmiques de 600 kW i dues de 500 kW en cada mode respectivament. El COP d'aquestes bombes és: 6 per la refrigeració i 4 per a la calefacció. Per tant, per a realitzar aquests càlculs es farà servir un COP= 6 ja que és el que correspon a la refrigeració, que és el consum més elevat de potència, i així es garanteix el subministrament durant tot l'any. També s'assignarà l'ús de dues bombes de 600 kW i una de 500 kW, donant un total de 1700 kW, per tal de cobrir els 1695,23 kW de potència que es necessiten en aquest cas.

3) Càlcul de la longitud de la sonda de captació geotèrmica.

Seguidament cal dissenyar i dimensionar la instal·lació geotèrmica, per això és necessari conèixer les propietats del terreny (descrites anteriorment).

Com ja s'ha explicat, en la zona estudiada hi trobem tres capes, R, A i B. Per realitzar els càlculs obviarem la capa R, ja que correspon a materials de reple, i la capa A, ja que no té una potència molt significativa, d'aquesta manera se simplificaran els càlculs,

tenint en compte només la capa B. A partir d'aquí, sabent que aquesta capa correspon al sòcol paleozoic format per un granit groller i a partir de la taula 7.2 de TECNOLOGÍA Y RECURSOS DE LA TIERRA, S.A.: SANCHEZ, J., SANZ, L., OCAÑA, L. *Evaluación del potencial de energía geotérmica. Estudio Técnico PER 2011-2020*. Madrid, 2011, es determina que el potencial tèrmic superficial té un rang de 60-80 W/m.

Grupo	Tipo de litología	Caracterización hidráulica	Potencial térmico superficial (W/m)
A	Arenas, gravas arcillas y limos	Muy secos y nivel muy profundo (>30 m)	< 25
B	Arcillas y limos	Húmedos	30-50
C	Calizas, dolomías, basaltos y calcarenitas	Húmedos	40-60
D	Gravas, gravillas, arenas, areniscas, granitos y otras rocas metamórficas con esquistos y gneises	Húmedos. Nivel somero.	60-80
E	Gravas y arenas	Muy permeables, nivel muy somero y elevada circulación de agua	80-100

Taula 3.- Grups de litologies establertes en funció de característiques tèrmiques de la roca i potencial tèrmic corresponent. Font: TECNOLOGÍA Y RECURSOS DE LA TIERRA, S.A.: SANCHEZ, J., SANZ, L., OCAÑA, L. Evaluación del potencial de energía geotérmica. Estudio Técnico PER 2011-2020. Madrid, 2011.

A continuació es calcularà la longitud de la perforació en base a la norma UNE-EN 14511-3:2012, que determina les equacions pel càlcul.

Primer cal calcular la potència de l'evaporador, és a dir la potència d'intercanvi de calor. S'utilitza la potència calculada de la bomba geotèrmica i el COP establert anteriorment.

$$\text{Potència evaporador}_{\text{terreny}} = \frac{[1.695,23 \text{ kW} * (6-1)]}{6} = 1.412,691 \text{ kW} = 1.412.691 \text{ W}$$

A partir de la potència de l'evaporador i el potencial tèrmic del terreny, es calcula la longitud de la sonda.

$$\text{Longitud}_{\text{sonda}} = \frac{1.412.691 \text{ W}}{70 \text{ W/m}} = 20.181,30 \text{ m} = 20,18 \text{ km}$$

D'aquí s'obté que per a disposar d'una bomba de calor de 1.695,23 kW, cal dissenyar una sonda geotèrmica (intercanviador geotèrmic) amb una potència d'intercanvi de 1.412,69 kW i, per aconseguir-la, cal fer una perforació de 20,18 km. S'ha de tenir en compte que, perquè la profunditat correspongui amb la calculada, el terreny hauria de tenir les mateixes característiques en tota aquesta longitud.

4) Dimensionat de la instal·lació. Situació dels sondejos i profunditats.

Com que no és possible fer una perforació tant profunda, s'haurà de dividir la longitud a perforar en varis sondejos a profunditats menors.

A partir de dades bibliogràfiques se sap que és necessari un espaiat mínim de 10 m entre els diferents sondejos per tal de que no hi hagi interferència tèrmica entre uns i altres. S'ha comprovat, amb un programa d'ordinador, com afectaria un espaiat de 10 m entre els sondejos i s'ha vist que l'evolució al llarg dels anys del fluid transportador era bona. Posteriorment s'ha fet el mateix amb espaiats de 5, 7 i 15, i s'ha vist que en el cas de 7 m la temperatura del fluid transportador de la calor disminuïa 1,5 °C, el mateix passava en el cas de 5 m. També s'ha vist que en el cas de 15 m, aquesta augmentava 1,5 °C. Així doncs, com major és l'espaiat entre sondejos, major és la temperatura que assoleix el fluid transportador i, com a conseqüència, major és l'eficiència del circuit.

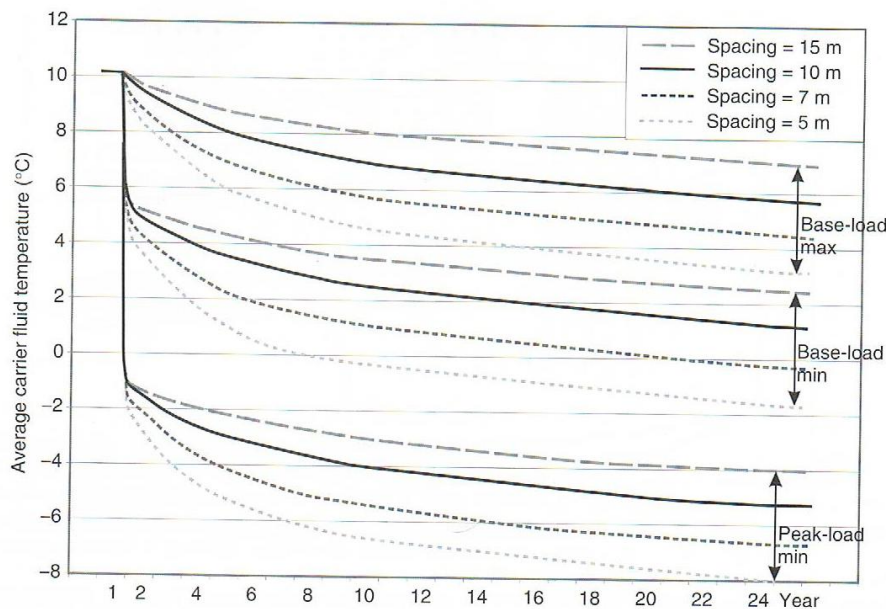


Figura 5.- Influència de l'espaiat dels sondejos en el rendiment. Evolució de la temperatura del fluid transportador en un circuit de 15 sondejos, amb un espaiat que va de 15 m a 5 m. Font: BANKS, D. *An introduction to Thermogeology Ground Source Heating and Cooling*. Oxford: Blackwell Publishing Ltd, 2008.

En aquest cas s'ha assolit un espaiat de 10 m perquè amb aquesta separació l'eficiència del circuit és bona i perquè és necessari fer una gran quantitat de sondejos.

A continuació es mostra la situació dels sondejos que s'haurien de fer. S'han realitzat varis models diferents per a la disposició d'aquests. Utilitzant una quadrícula en que cada quadrat representa una superfície de 5 x 5 m, s'ha deixat una separació de dos

quadres entre ells, mantenint així un espaiat de 10 m. S'ha calculant per a cada model la profunditat dels sondejos, que dependrà del nombre que se'n realitzin.

- A) S'han col·locat els sondejos per tota l'àrea del CEM Can Caralleu. En total s'ha disposat de 174 sondejos a 115,98 m de profunditat cada un.

$$\text{Profunditat sondeig} = \frac{20.181,30 \text{ m}}{174 \text{ sondejos}} = 115,98 \text{ m/sondeig}$$

S'han realitzat 2 models diferents més, concentrant els sondejos en una única zona.

- B) S'han concentrat els sondejos en una franja de NW a SE. En aquest cas s'ha disposat de 111 sondejos a 181,81 m de profunditat cada un.

$$\text{Profunditat sondeig} = \frac{20.181,30 \text{ m}}{111 \text{ sondejos}} = 181,81 \text{ m/sondeig}$$

- C) En aquest últim model s'han concentrat els sondejos a la zona no edificada, on hi ha el camp de futbol i altres pistes, a la zona S. En total s'ha disposat de 117 sondejos a 172,49 m de profunditat cada un.

$$\text{Profunditat sondeig} = \frac{20.181,30 \text{ m}}{117 \text{ sondejos}} = 172,49 \text{ m/sondeig}$$

Model A:

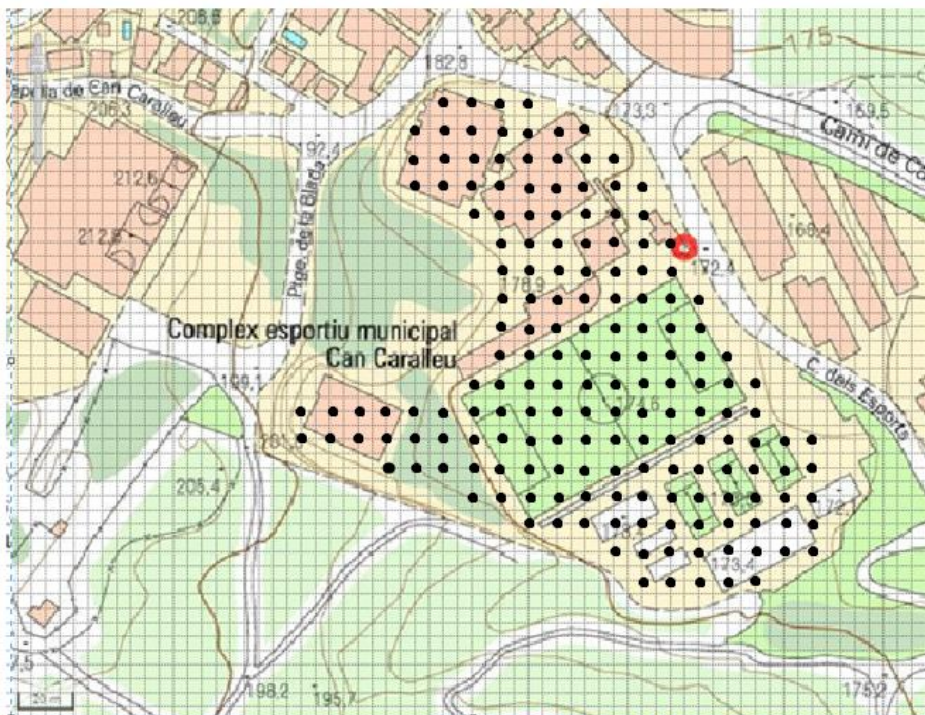


Figura 6.- Esquema de la situació dels sondejos del model A. Font: creació pròpia a partir de mapa topogràfic 1:5.000 de l'ICGC.

Model B:

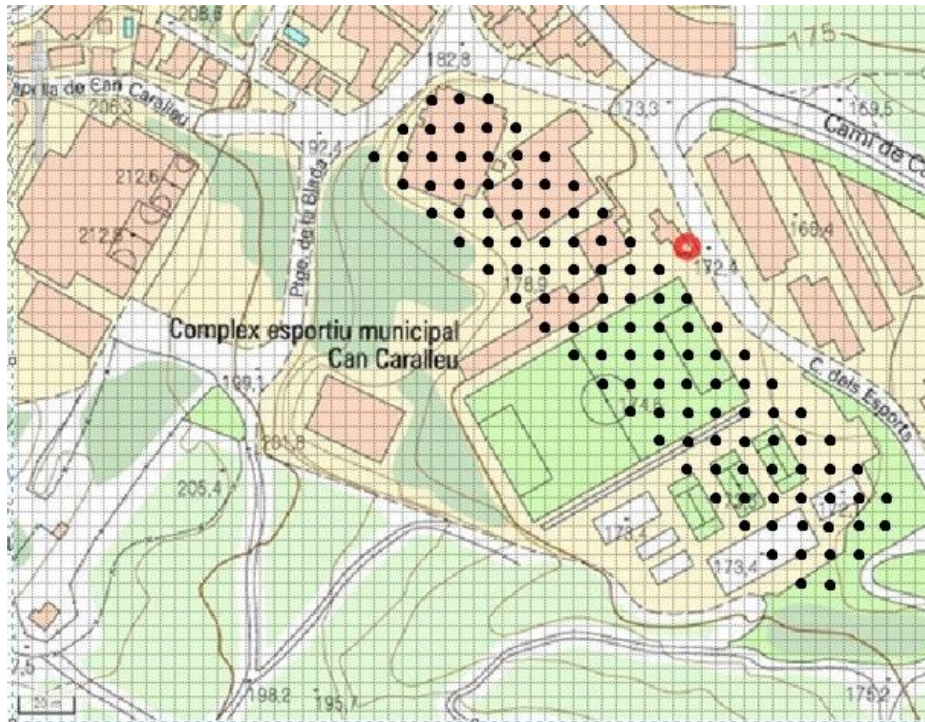


Figura 7.- Esquema de la situació dels sondejos del model B. Font: creació pròpia a partir de mapa topogràfic 1:5.000 de l'ICGC.

Model C:



Figura 8.- Esquema de la situació dels sondejos del model C. Font: creació pròpia a partir de mapa topogràfic 1:5.000 de l'ICGC.

5) Càlcul del consum elèctric anual de la bomba de calor.

Tot i que, com ja s'ha dit, es faran servir tres bombes diferents, el càlcul del consum elèctric anual es farà tot junt a partir de la potència total de les tres bombes. Per a calcular el consum anual de les bombes de calor, primer cal saber la potència elèctrica d'aquestes. Com se sap que tenen un COP=6, això indica que per cada kW de consum d'energia elèctrica produeixen 6 kW d'energia calorífica. Així doncs, sabent que les bombes tenen una potència de 1700 kW d'energia calorífica, se sap que tenen una potència elèctrica de 283,33 kW.

Les hores de funcionament en un any són el resultat del producte del factor de capacitat (FC=0,19, valor explicat anteriorment) per les hores de l'any (8760 h/any). Un total de 1664,40 hores.

$$\text{Consum anual} = 283,33 \text{ kW} * \frac{1664,40 \text{ h}}{\text{any}} = 471.574,45 \frac{\text{kWh}}{\text{any}} \approx 470.000 \frac{\text{kWh}}{\text{any}} \\ \approx 470 \text{ MWh/any}$$

6) Càlcul del cost econòmic

- Cost del consum de la bomba de calor.

El cost anual lligat al consum de la bomba de calor, si es té en compte un preu de l'electricitat (tarifa elèctrica i costos associats) d'aproximadament 0,10 €/kWh, llavors el preu que s'haurà de pagar a l'any pel consum de la instal·lació serà de:

$$\text{Cost econòmic} = 470.000 \frac{\text{kWh}}{\text{any}} * 0,10 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 47.000 \text{ €/any}$$

- Cost de les perforacions dels sondejos.

S'ha consultat el cost de perforació a varies empreses de perforació e instal·lació de circuits d'energia geotèrmica i l'empresa Perforacions Mas S.L., que ha treballat per la zona estudiada, ha donat pressupostos. Ha informat que per les característiques del terreny, al ser granit, és un terreny més costós de perforar i pot produir trencaments de les broques, i que per tant el cost de perforació seria 30 €/m perforat. Amb aquesta informació i sabent que el total a perforar són 20.181,30 m es pot calcular el cost total de perforació:

$$\text{Cost perforació} = 20.181,30 \text{ m} * 30 \text{ €/m} = 605.439 \text{ €}$$

- Cost de la sonda geotèrmica.

Mitjançant la pàgina web generadora de preus 'www.generadordeprecios.info', s'ha consultat el preu de la sonda geotèrmica.

S'ha determinat una sonda geotèrmica per a instal·lació vertical, de 110 o 150 m (segons la profunditat dels sondejos) i 96 mm de diàmetre, formada per un

tub de polietilè d'alta densitat de 32 mm de diàmetre i 2,9 mm d'espessor, i un peu amb forma de V, on es solden els tubs. El pes de la sonda és de 371,25 kg i la temperatura de treball, entre -20°C i 30°C.

Així doncs es mostren els diferents costos aproximats de les sondes per a cada model:

- Model A) 174 sondes a 490 €/sonda, s'obté un total de 85.260 €.
 - Model B) 111 sondes a 610€/sonda, s'obté un total de 67.710 €.
 - Model C) 117 sondes a 610€/sonda, s'obté un total de 71.370 €.
- Cost total de la instal·lació.
El cost total aproximat de la instal·lació (perforació + sondes) segons cada model seria:
 - Model A) 605.439 € + 85.260 € = 690.699 €.
 - Model B) 605.439 € + 67.710 € = 673.149 €.
 - Model C) 605.439 € + 71.370 € = 676.809 €.

Conclusions

Després de realitzar tot aquest treball s'han tret algunes conclusions, que seran exposades a continuació.

El CEM Can Caralleu podria fer ús de l'energia geotèrmica de molt baixa entalpia situada al subsòl de la zona, amb la finalitat de cobrir les necessitats tèrmiques de l'edifici.

Per tal de que això fos possible, s'hauria de realitzar una instal·lació geotèrmica de circuit tancat, ja que en aquest cas l'energia geotèrmica es troba emmagatzemada en els materials del subsòl i no en un aqüífer, i utilitzar una bomba de calor geotèrmica.

Sabent que el centre té unes necessitats tèrmiques de 2.821.550 kWh a l'any, caldria instal·lar dues bombes geotèrmiques de 600 kW i una de 500 kW per tal de cobrir la potència necessària de 1.695,23 kW, i amb un coeficient de rendiment 6.

Per les característiques del terreny se sap que aquest té un potencial tèrmic superficial de rang de 60-80 W/m, pel que la sonda geotèrmica hauria de tenir una potència d'intercanvi de 1.412,69 kW. Per tal d'aconseguir aquesta potència caldria fer una perforació de 20,18 km. Al ser una profunditat tant gran, resulta impossible de realitzar, pel que s'han dissenyat tres models diferents en els que s'han repartit varis sondejors per la zona, a profunditats menors.

Sabent que el centre ja és actiu fa anys i que per tant, ja està edificat, s'ha de tenir en compte que els dissenys representats en els models A i B serien impossibles de realitzar actualment, degut a que els sondejors se situen sota zones ja edificades. Per

altra banda, el model C representa un disseny que si que és possible de realitzar actualment, ja que els sondejos se situen en zones de camps i pistes, i aquests podrien ser remoguts temporalment.

Finalment, s'ha calculat un consum de la bomba de calor geotèrmica de 470 MWh a l'any, el que representaria un cost de 47.000 € l'any.

El cost total aproximat de la instal·lació (perforació + sondes) variarà segons el model, ja que els preus de les sondes varien segons la profunditat i el nombre. Així doncs els preus serien: 690.699 €, 673.149 € i 676.809 € pels models A, B i C respectivament.

Tot i que la instal·lació és cara, s'ha de tenir en compte que actualment el centre té un consum de 2.821.550 kWh de gas a l'any, i que amb la instal·lació d'energia geotèrmica el consum de la bomba geotèrmica seria de 470.000 kWh, el que representa una reducció important. Això es veuria reflectit en els costos econòmics anuals ja que passarien de 170.084 € a 47.000 € a l'any. Amb tot això es conclou que si que sortiria a compte realitzar aquesta instal·lació.

Agraïments

Primer de tot, agraeixo al meu tutor del treball, David Pérez, per guiar-me durant tot el treball i atendre'm sempre que ha sigut necessari. També agraeixo a Óscar Marín, tècnic de manteniment del CEM Can Caralleu, per la seva col·laboració en proporcionar-me informació sobre el centre; a Salvador Matas, arquitecte del CEM Can Caralleu, per la seva col·laboració en proporcionar-me un informe geotècnic del terreny; i a Jordi Mas, de l'empresa Perforacions Mas S.L., per la seva col·laboració en els pressupostos.

Bibliografia

BANKS, D. *An introduction to Thermogeology Ground Source Heating and Cooling*. Oxford: Blackwell Publishing Ltd, 2008.

Generalitat de Catalunya. Departament de Medi Ambient i Habitatge. Direcció General del Medi Natural. *Geozona 339: Paleozoic de la serra de Collserola i Santa Creu d'Olorda*.

GWE PESA Engineering. *Sondas para geotèrmia*.

KAGEL, A. *The State of Geothermal Technology - Part II: Surface Technology*. Geothermal Energy Association. January 2008.

LLOPIS TRILLO, G.; RODRIGO ANGULO, V. *Guía de la Energía Geotérmica*. Comunidad de Madrid. 2008.

MANDS, E.; SANNER, B. *Shallow Geothermal Energy*. UBeG GbR, Zum Boden 6, D-35580 Wetzlar.

MATAS, S. *Projecte d'execució del poliesportiu municipal Can Caralleu al c/.Esports 2-8, Barcelona. Annex 2. Estudis geotècnics. (2003).*

TECNOLOGÍA Y RECURSOS DE LA TIERRA, S.A.: SANCHEZ, J., SANZ, L., OCAÑA, L. *Evaluación del potencial de energía geotérmica. Estudio Técnico PER 2011-2020*. Madrid, 2011.

TOIMIL, D., MAYORAL, G.R., TRULLAS, M. *Gestión de un sistema geotérmico cerrado de gran escala. Hospital de Mollet*.

VAILLANT GROUP: FERNÁNDEZ, S. *Geotermia*. Diciembre 2009.

Webs

www.energylab.es

www.generadordeprecios.info

www.icc.cat/vissir3

Annexes

Annex 1: L'energia geotèrmica

1. Generalitats i conceptes

En un sentit ampli, l'energia geotèrmica és l'energia calorífica que la Terra transmet des de les seves capes internes fins les capes més externes de l'escorça terrestre. Aquesta energia engloba la calor emmagatzemada en roques, sòls i aigües subterrànies, a qualsevol temperatura, profunditat i procedència, però no engloba la calor continguda en masses d'aigua superficials, continentals o marines.

Segons consta en el Manual de geotèrmia editat per l'IDAE (*Instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía*), es consideren 'renovables' les fonts energètiques primàries que tenen el seu origen en la radiació solar, ja sigui de manera directa, com la solar tèrmica o la fotovoltaica, o de manera indirecta, com l'eòlica, hidroelèctrica i la biomassa. Per tant, l'energia geotèrmica és considerada una energia renovable però, en aquest cas i a diferència de la resta, la font d'energia prové de la calor interna de la Terra, que té origen en els moviments diferencials entre les diferents capes d'aquesta (sobretot entre el mantell i el nucli), en la calor que es va alliberar durant la seva formació (que encara està arribant a la superfície), en la desintegració d'isòtops radioactius presents en l'escorça i el mantell (bàsicament urani 235, urani 238, tori 232 i potassi 40) i en la calor latent de cristallització del nucli extern.

En la Directiva 2009/28/CE es defineix l'energia geotèrmica com 'l'energia emmagatzemada en forma de calor sota la superfície de la terra sòlida (Article 2)'.

En la Declaració de Brussel·les de 2009 del Consell Europeu d'Energia Geotèrmica (EGEC) la definició coincideix amb l'anterior, 'energia emmagatzemada en forma de calor sota la superfície de la Terra'. També defineix que 'és una font d'energia sostenible, renovable, casi infinita, que proporciona calor i electricitat les 24 hores del dia al llarg de tot l'any'.

També cal definir alguns altres conceptes:

- **Gradient geotèrmic:** increment de temperatura registrat al profunditzar des de la capa més externa de la Terra, l'escorça, fins les parts interiors d'aquesta. El gradient geotèrmic més comú en la major part de la Terra, anomenat **gradient geotèrmic normal**, és d'uns 2,5-3 °C cada 100 metres. Tot i així hi ha zones de la Terra on trobem un **gradient geotèrmic anòmal**, situades sobre àrees geològicament actives de l'escorça terrestre i on l'increment de temperatura amb la profunditat és molt major.

Permet estimar el flux de calor transmès i representa la quantitat de calor que es desprèn per unitat de superfície, expressat en mW/m^2 .

- Fluid geotèrmic: és la substància que es fa servir per transportar de forma concentrada fins la superfície la calor difosa continguda en les roques i sòls mitjançant sondejos, sondes geotèrmiques, col·lectors horitzontals o intercanviadors de calor terra-aire enterrats. Aquest fluid geotèrmic sol ser aigua present en el subsòl (líquida o vapor) o bé altres fluids d'intercanvi que es bombegen des de la superfície.

Una vegada en superfície, aquest fluid es destinarà segons el contingut en calor, a la producció d'energia elèctrica o s'aprofitarà de manera directa.

Totes les característiques físiques i químiques d'aquest fluid geotèrmic poden influir en el disseny dels sistemes d'aprofitament, sobretot de les centrals elèctriques.

- Recurs geotèrmic: és la fracció de l'energia geotèrmica que pot ser aprofitada de forma tècnica i econòmicament viable. Aquest concepte abasta des de la calor que es pot trobar en els horitzons més superficials del sòl fins la que es troba emmagatzemada en roques a grans profunditats.
- Jaciment geotèrmic: espai físic en l'interior de l'escorça terrestre amb unes determinades condicions geològiques, en el que se situa un recurs geotèrmic l'explotació del qual és econòmicament viable. Dins d'aquest concepte no se solen incloure els recursos de mol baixa temperatura.
- Entalpia: Quantitat d'energia tèrmica que un sistema pot intercanviar amb l'entorn. S'expressa en kJ/kg o en Kcal/kg.

2. Recursos geotèrmics

Els recursos geotèrmics es classifiquen segons el seu nivell tèrmic o entalpia, el que condiciona el seu aprofitament.

Els últims valors de temperatura fixats per la Plataforma Tecnològica Espanyola de Geotèrmia (GEOPLAT) per tal de limitar els diferents recursos geotèrmics són els següents:

- **Recursos geotèrmics d'alta entalpia ($T > 150\text{ }^{\circ}\text{C}$)**: Es troben en zones amb gradients geotèrmics anòmals i a profunditats molt variables (freqüents entre 1.500 i 3.000 m). Constituïts per vapor sec o, generalment, per una mescla d'aigua i vapor. El seu ús sol ser per la producció d'electricitat.
- **Recursos geotèrmics de mitja entalpia ($T: 100\text{-}150\text{ }^{\circ}\text{C}$)**: Localitzats també en zones de gradient geotèrmics anòmals però profunditats inferiors als 2.000 m i entre els 3.000 i 4.000 m en conques sedimentàries. S'utilitzen per la producció d'electricitat mitjançant cicles binaris i també per ús tèrmic en calefacció i refrigeració en sistemes urbans i processos industrials.
- **Recursos geotèrmics de baixa entalpia ($T: 30\text{-}100\text{ }^{\circ}\text{C}$)**: Habitualment es troben en zones amb un gradient geotèrmic normal a profunditats entre 1.500 i 2.500

m i en zones amb un gradient geotèrmic més elevat a profunditats inferiors a 1.000 m. Se'n fa un ús tèrmic en sistemes de calefacció/climatització i ACS (Aigua Calenta Sanitària) urbans i també en processos industrials. Els fluids geotèrmics utilitzats solen ser fluids d'intercanvi i no l'aigua present en el subsòl, també es poden utilitzar bombes de calor.

- **Recursos geotèrmics de molt baixa entalpia ($T < 30\text{ }^{\circ}\text{C}$):** Les temperatures d'aquests recursos s'acosten a la mitja anual del lloc on es capten. Es tracta de l'energia tèrmica emmagatzemada a les aigües subterrànies i en el subsòl poc profund (menys de 200 m). A partir dels 8-10 m de profunditat, la temperatura del terreny es manté pràcticament estable durant tot l'any degut a l'estabilitat tèrmica del subsòl davant l'oscil·lació estacional de l'ambient, això és conseqüència de la transmissió de calor cap a les zones més externes de l'escorça. Se'n fa un ús directe de la calor: aport energètic a sistemes de ventilació, calefacció i refrigeració de locals i/o processos, amb o sense bomba de calor.

3. Jaciments geotèrmics

Els jaciments geotèrmics generalment se solen classificar segons el nivell tèrmic o entalpia dels fluids que hi trobem, així doncs la classificació és quasi la mateixa que en el cas del recursos geotèrmics:

- **Jaciments d'alta entalpia ($T > 150\text{ }^{\circ}\text{C}$):** els fluids que hi ha es troben a alta pressió i temperatura.
- **Jaciments de mitja entalpia ($T: 100\text{-}150\text{ }^{\circ}\text{C}$):** els fluids es troben a temperatura mitja la qual varia entre 100 i 150 $^{\circ}\text{C}$.
- **Jaciments de baixa entalpia ($T: 30\text{-}100\text{ }^{\circ}\text{C}$):** els fluids estan a més baixa temperatura i pot variar de 30 a 100 $^{\circ}\text{C}$.

També cal anomenar:

- **Jaciments geotèrmics no convencionals ($T > 150^{\circ}\text{C}$):** casos especials del jaciments d'alta temperatura:
 - **Jaciments de roca calenta seca (HDR: *Hot Dry Rock*):** són creats per l'home mitjançant processos de fracturació hidràulica en materials geològics de poca permeabilitat i/o porositat i en condicions d'alta temperatura i profunditats no molt grans, amb absència de fluid. Aquests materials fracturats, que són escalfats degut a la proximitat de cambres magmàtiques en zones volcàniques, serviran com a cambra on es produirà un intercanvi tèrmic amb el fluid que es farà circular gracies a la injecció d'aquest des de la superfície. En el cas dels **jaciments de roca calenta fracturada (HFR: *Hot Fractured Rock*)** si que hi ha fluid i presenten fractures que es poden estimular artificialment. Els anomenats **Sistemes Geotèrmics**

Estimulats (EGS: *Enhanced Geothermal System*) són aquests en que és necessària l'actuació de l'home per la seva creació i/o estimulació activa.

- **Jaciments geotèrmics supercrítics ($T > 300\text{ °C}$):** la tecnologia necessària per aquests tipus de recursos suposa el desenvolupament d'equips que puguin funcionar a llarg termini a temperatures extremadament elevades en regions volcàniques. Les condicions termodinàmiques permetrien la producció d'electricitat e hidrogen.
- **Jaciments geopresuritzats:** l'aigua continguda en l'aqüífer està sotmesa a grans pressions, molt superiors a la pressió hidrostàtica que correspondria, i està segellada evitant l'intercanvi amb el voltant. Generalment es formen en conques sedimentàries de gradient geotèrmic normal però on l'aigua es troba a més de 6.000 m de profunditat i, d'aquesta manera, a més de 150°C. A més de l'energia tèrmica de l'aigua, també hi trobem energia mecànica per la pressió i cert potencial d'energia de combustió, pel metà dissolt en l'aigua.

En el cas dels recursos de molt baixa temperatura no s'aplica el terme jaciment ja que és un recurs que es troba difós per tota la superfície de la Terra.

4. Aplicacions de l'energia geotèrmica

Com s'ha comentat anteriorment, l'aprofitament de l'energia geotèrmica va lligat al recurs geotèrmic. Així doncs, segons el nivell tèrmic o entalpia del recurs, es podran fer servir dos tipus d'aplicacions o aprofitaments de l'energia, tenint en compte també les tecnologies de les que es disposa: producció d'electricitat o ús directe de la calor.

4.1. Producció d'electricitat

S'aplica als recursos d'alta i mitja entalpia, també en els sistemes geotèrmics estimulats.

Recursos

L'energia geotèrmica amb finalitat de produir electricitat sol venir de tres tipus diferents de fluids, que alhora es poden anomenar recursos:

- **Recursos de vapor sec:** són sistemes hidrotermals d'alta temperatura en els que la fase dominant és la gasosa i la fase líquida és molt petita o inexistent, és per això que corresponen als anomenats **sistemes de vapor dominant**. No requereixen la separació del vapor de l'aigua, per tant són els més favorables per la producció d'electricitat ja que l'energia és molt fàcil d'aprofitar. Tot i que són els menys freqüents, alguns exemples són: The Geysers, a Califòrnia, o Lardarello, a Itàlia.

- **Recursos de vapor humit:** són sistemes hidrotermals d'alta temperatura però en aquest cas la fase que predomina en el fluid és la líquida, tot i que al ascendir el fluid es converteix en una mescla d'aigua líquida i vapor, el qual es pot aprofitar directament per produir electricitat, que es descarrega a través de pous de producció. Són molt freqüents.
- **Recursos de moderada entalpia:** són sistemes hidrotermals que produeixen fluid líquid únicament i que, per tant, serà l'únic transportador de calor en aquest cas. Però com que no se'n pot aprofitar directament el vapor per produir electricitat degut a que no surt a una pressió suficientment alta, existeix una altra tècnica, el **cicle binari**. Aquesta tècnica funciona mitjançant l'intercanvi de la calor de l'aigua a un altre fluid (fluid secundari) amb temperatura de vaporització inferior, de manera que aquest nou fluid sí que produeix un vapor a alta pressió capaç de moure un sistema turbina-generador que generarà electricitat.

És important saber que si el nivell tèrmic del recurs disminueix, el consum específic de la central de generació d'energia elèctrica augmenta, de manera que el rendiment és pitjor.

Plantes

Així doncs, segons les característiques del fluid present i de la seva profunditat s'haurà de generar energia d'una manera o d'una altra. Hi ha tres tipus de plantes per generar energia elèctrica procedent de recursos geotèrmics:

- **Plantes de vapor sec:** El fluid que arriba a la superfície a través de les fractures és vapor saturat o lleugerament rescalfat (vapor sec) que es dirigeix directament a una turbina per produir electricitat. El cost de producció és molt baix. Actualment, aproximadament el 40% de l'electricitat geotèrmica que es produeix als Estats Units té origen en aquest tipus de plantes, totes a The geysers, Califòrnia. També s'utilitza a Matsukawa, Japó.

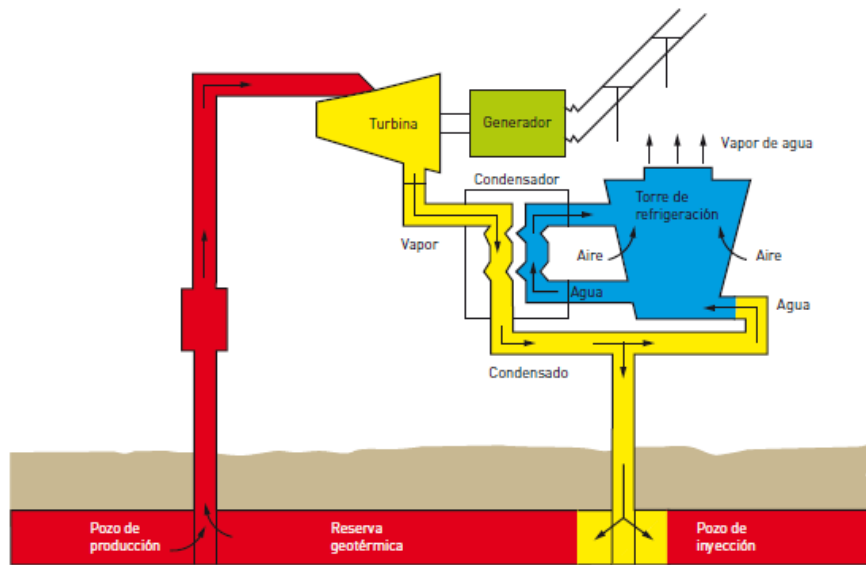


Figura 1.- Esquema de funcionament d'una planta de vapor sec. Font: KAGEL, A. *The State of Geothermal Technology - Part II: Surface Technology*. Geothermal Energy Association. January 2008.

- **Plantes flash:** solen utilitzar recursos que tenen temperatures d'entre 180 i 250°C. El fluid que arriba a la superfície és una mescla de dues fases, vapor i líquid (salmorra), pel que és necessari separar-les. El fluid s'envia a uns separadors vapor/aigua, d'on el vapor separat és enviat directament a una turbina per produir electricitat i la part líquida és rebutjada, podent-se utilitzar per a altres aplicacions. Són les més comuns per l'aprofitament del recurs geotèrmic d'alta entalpia.

El cicle flash pot constar d'una o varies etapes, tantes com permeti l'entalpia de l'aigua separada. Els sistemes de vapor de doble flash passen la salmorra calenta per dos separadors de manera que hi ha dos separacions de vapor/aigua, la segona a baixa pressió, d'aquesta manera s'aprofita més el recurs geotèrmic. Un exemple de plantes amb cicle doble flash el trobem a Wairakei (Nova Zelanda).

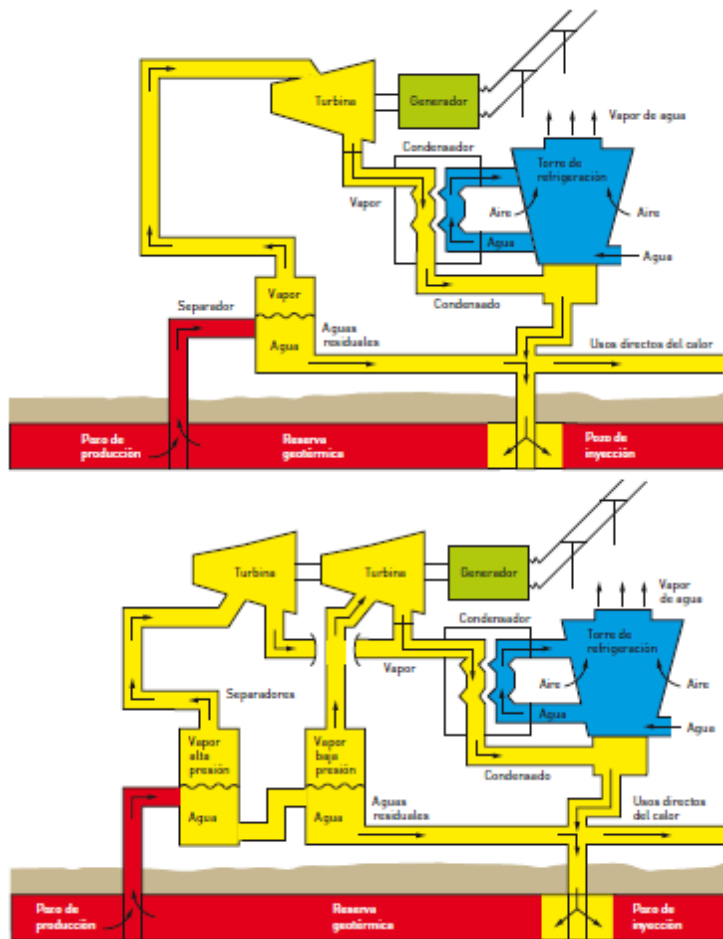


Figura 2.- Esquemes de funcionament de plantes flash (a dalt) i doble-flash (a baix). Font: KAGEL, A. *The State of Geothermal Technology - Part II: Surface Technology*. Geothermal Energy Association. January 2008.

- **Plantes de cicle binari:** utilitzen recursos de mitja temperatura (entre 100 i 150°C) i d'alta salinitat, actualment poden utilitzar-ne d'entre 75 i 180 °C, i ho fan més eficientment que les plantes flash ja que provoquen un impacte ambiental menor.

Com s'ha explicat anteriorment, el cicle binari consisteix en un intercanvi de calor a un fluid secundari que es calenta i vaporitza, accionant així la turbina per produir electricitat. Posteriorment, aquest vapor es condensa i es bombeja una altra vegada a l'intercanviador, on torna a vaporitzar-se, quedant-se així en un circuit tancat. Si el fluid geotèrmic té suficient entalpia (>200 kcal/kg), es pot utilitzar aigua com a fluid secundari però si no en té (jaciments de mitja temperatura) s'utilitza algun altre fluid amb un millor comportament termodinàmic com mescles d'hidrocarburs altament volàtils.

La generació d'energia elèctrica a partir de recursos de baixa entalpia (fins 180°C) només és econòmicament viable en plantes binaries que segueixen el

procés *Organic Rankine* (ORC: *Organic Rankine Cycle*) com es fa als Estats Units o el procés *Kalina*.

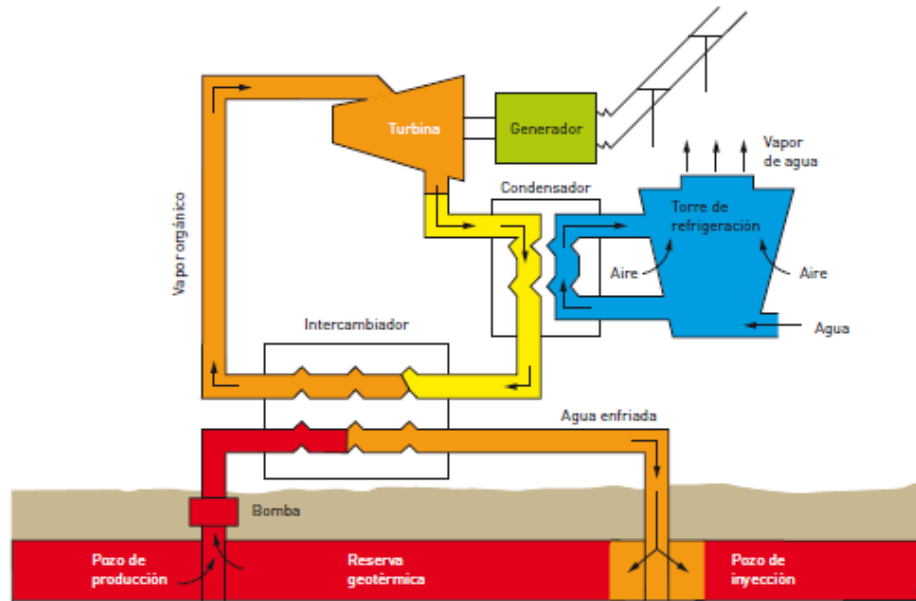


Figura 3.- Esquema de funcionament d'una planta de cicle binari. Font: KAGEL, A. *The State of Geothermal Technology - Part II: Surface Technology*. Geothermal Energy Association. January 2008.

- **Plantes de cicle combinat:** utilitza tots els beneficis de les tecnologies flash i binaria. El vapor separat amb un sistema flash passa a una turbina per generar electricitat i, per altra banda, el vapor que surt d'aquesta turbina a més baixa pressió es condensa en un sistema binari.

On funciona millor aquest sistema és en jaciments amb vapor a alta pressió.

Un exemple es pot trobar en la instal·lació Puna Geo Venture, a Hawaii.

Cal destacar també els **sistemes geotèrmics híbrids**, en els que es combinen altres fonts d'energia a més de la geotèrmica, i les tecnologies d'aprofitament dels ja esmentats anteriorment **Sistemes Geotèrmics Estimulats (EGS)** amb els quals encara s'està experimentant.

4.2. Ús directe de la calor

Tot i que l'aprofitament de l'energia geotèrmica per a altres usos que no siguin la producció d'electricitat s'ha fet sempre a petita escala, actualment i amb l'avenç de la tecnologia cada cop se'n fa un ús major. Així doncs, a partir de la utilització directa de la calor geotèrmica se'n poden fer molts usos: climatització de piscines i balnearis, calefacció i refrigeració, producció d'aigua calenta sanitària (ACS), aquicultura i aplicacions agrícoles (hivernacles i escalfament de sòls) i industrials (extracció de mineral i secament d'aliments o materials).

Per fer-ne aquest ús, les temperatures utilitzades són: entre 30 i 150 °C, en el cas dels recursos geotèrmics de baixa i mitja entalpia que generalment es troben en jaciments profunds entre 1.500 i 3.500 metres de profunditat, i entre 15 i 20 °C en els casos de recursos de molt baixa entalpia o somers, inclosos els aqüífers convencionals.

4.2.1. Geotèrmia somera

És la que correspon als recursos de molt baixa entalpia ($T < 30$ °C).

El subsòl, en els seus primers 100-200 m de profunditat té una estabilitat tèrmica molt elevada davant dels canvis de temperatura de l'exterior, pel que resulta un bon magatzem per acumular i proporcionar energia tèrmica. Al arribar als 10-20 m, la temperatura es manté constant i a partir d'aquí va augmentant segons el gradient geotèrmic (3 °C cada 100 m).

Sistemes

Les diferents tecnologies utilitzades per aprofitar aquesta energia tèrmica depenen principalment de l'accessibilitat al recurs geotèrmic, això dóna lloc a dos tipus de sistemes que es diferencien principalment en la manera de transportar la calor:

- **Sistemes oberts:** són els que utilitzen l'aigua subterrània directament, de manera que la capten de l'aqüífer per al seu posterior aprofitament. L'aigua subterrània extreta és la pròpia transportadora de la calor i no és necessari res més.
- **Sistemes tancats:** en aquest cas no és l'aigua sola la transportadora de la calor sinó que s'utilitza un fluid, que sol ser aigua amb algun additiu, que és el que extreu la calor del material del subsòl i el transporta. Aquest tipus de sistemes impliquen la instal·lació d'un intercanviador al terreny per tal de que la calor passi del material al fluid, la paret d'aquest intercanviador és el que separa el fluid transportador del material i aigua subterrània, dels quals se'n extreu la calor.

Es podria afegir un tercer tipus, en el que hi ha una diferenciació entre el fluid transportador de la calor i l'aigua subterrània però no hi ha cap mena de barrera que els separi un de l'altre. Un exemple seria els casos en que s'aprofita la temperatura de les aigües de mines o obres subterrànies les quals tenen cabals suficients com per a la seva explotació per fins energètics.

Tecnologies

Per aprofitar aquesta energia que es troba a tant poca profunditat es fan servir dos tecnologies diferents:

- **Bomba de calor geotèrmica, o bomba per calor de font terrestre (GHP: *Geothermal Heat Pump*):** Consisteix en la utilització d'una bomba que extrau la

calor del terreny, augmentant-la a partir del consum d'energia elèctrica, i posteriorment utilitzar-la en sistemes de calefacció. Aquesta bomba pot transferir la calor obtinguda del terreny, que se sol trobar a temperatures baixes, fins les edificacions i escalfar-les perfectament.

Aquestes bombes funcionen com les bombes de calor convencionals (aire-aire i aire-aigua) de manera que tant poden escalfar, com refrigerar, com fins i tot proporcionar aigua calenta sanitària. D'aquesta manera el procés es pot dur a terme del revés, injectant al terreny la calor absorbida durant el procés de refrigeració de la instal·lació a climatitzar.

En la gran majoria de casos és aquesta la única tecnologia que possibilita l'aprofitament d'aquesta energia geotèrmica de molt baixa temperatura que es troba present sota qualsevol terreny a qualsevol lloc del planeta, perfecte per cobrir les necessitats de climatització dels edificis.

En els **sistemes oberts** hi ha dos sondejos, un per extreure l'aigua subterrània i l'altre per reinjectar-la al mateix aquífer. En el sondeig d'extracció hi ha una bomba submergible que condueix l'aigua cap a la bomba de calor, la qual li extreu l'energia i la retorna a l'aquífer o l'aboca a una llera superficial. Per aquests sistemes és necessària una bona permeabilitat del terreny i una certa qualitat de l'aigua.

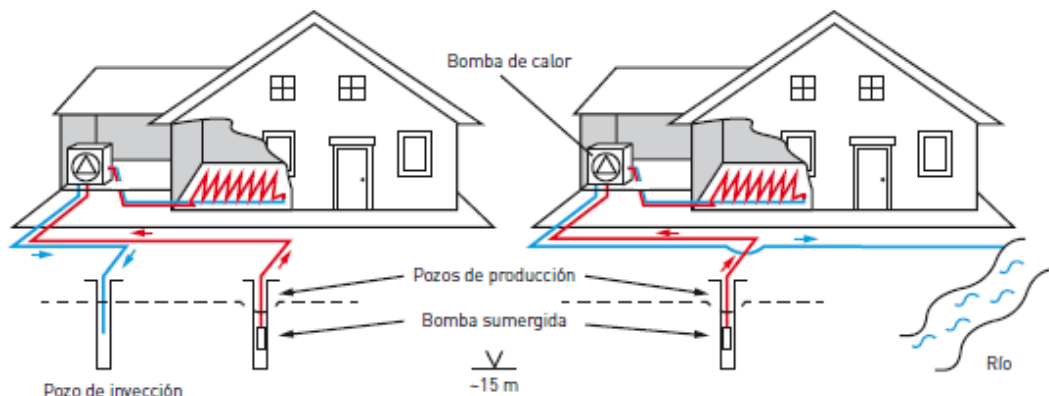


Figura 4.- Diagrames de funcionament d'una bomba de calor geotèrmica amb sondejos de captació d'aigua (sistema obert). Font: LLOPIS TRILLO, G.; RODRIGO ANGULO, V. Guía de la Energía Geotérmica. Comunidad de Madrid. 2008.

En els **sistemes tancats**, el fluid transportador de la calor es troba dins l'intercanviador enterrat, en un circuit tancat, i és aquest el que cedeix la calor a la bomba i a la inversa. Aquests sistemes permeten aprofitar aquesta energia de les capes més someres quan la impermeabilitat o profunditat no permeten explotar les aigües del subsòl. Poden ser horitzontals o verticals segons com estiguin situats els intercanviadors en el terreny.

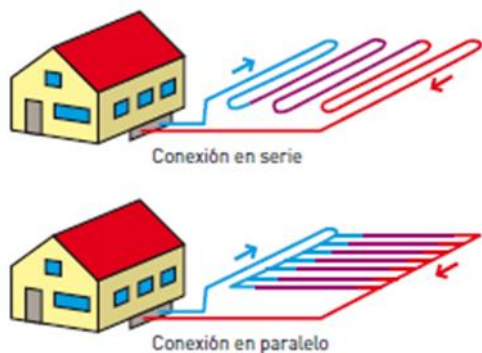


Figura 5.- Sistema tancat amb intercanviador de calor horitzontal. Font: MANDS, E.; SANNER, B. *Shallow Geothermal Energy*. UBeG GbR, Zum Boden 6, D-35580 Wetzlar.

- **Emmagatzematge subterrani d'energia tèrmica (UTES: *Underground Thermal Energy Storage*):** Consisteix en l'emmagatzematge subterrani de calor, fred o ambdós.

Un exemple és l'emmagatzematge de la calor de la radiació solar a la superfície d'una carretera per la posterior utilització per desfer la neu o el gel acumulats a l'hivern.

Sistemes oberts: Emmagatzematge en aqüífers (ATES: *Aquifer Thermal Energy Storage*): En aquests sistemes l'aigua subterrània és el transportador de la calor. Tenen una alta porositat, una conductivitat i transmissivitat hidràulica mitja a baixa i el flux d'aigua subterrània és baix o nul. Exemples: aqüífers porosos en sorres, graves i eskers, i aqüífers fracturats en calcàries, gresos i roques ígnies o metamòrfiques.

Sistemes tancats: Emmagatzematge en perforacions (BTES: *Borehole Thermal Energy Storage*): Aquests sistemes requereixen perforacions i canonades. Tenen un grau de calor específic alt, conductivitat tèrmica mitja i el flux d'aigua subterrània és nul. Exemples: esquists, margues, argiles, calcàries, gresos, granit i gneiss.

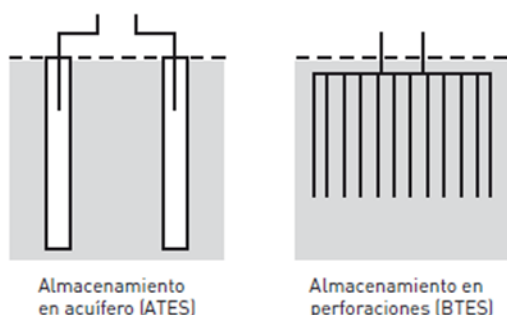


Figura 6.- Sistemes d'emmagatzematge subterrani de la calor geotèrmica. Font: MANDS, E.; SANNER, B. *Geothermal Heat Pumps*. UBeG GbR, Zum Boden 6, D-35580 Wetzlar.

4.2.2. Jaciments profunds

Corresponen als recursos geotèrmics de baixa entalpia ($T < 100\text{ }^{\circ}\text{C}$). Acostumen a trobar-se en magatzems sedimentaris profunds (2.000-2.500 m), accessibles mitjançant la perforació, pel que és necessària una forta demanda a prop del recurs perquè sigui rentable en sistemes de calefacció.

Al igual que en el cas de la bomba de calor geotèrmica, són necessaris dos sondejos per extreure i re injectar. Es perfora un sondeig on hi ha el magatzem per obtenir un flux constant d'aigua calenta (fluid geotèrmic), seguidament es condueix l'aigua fins la superfície per bombeig i mitjançant canonades la calor és cedida per l'ús previst. En aquests sistemes també es fa servir un intercanviador de calor en el que és un fluid en un circuit tancat el que transporta la calor, ja que en aquests magatzems profunds l'aigua, al circular calenta a través de la roca, adquireix grans quantitats de salts que queden dissoltes.

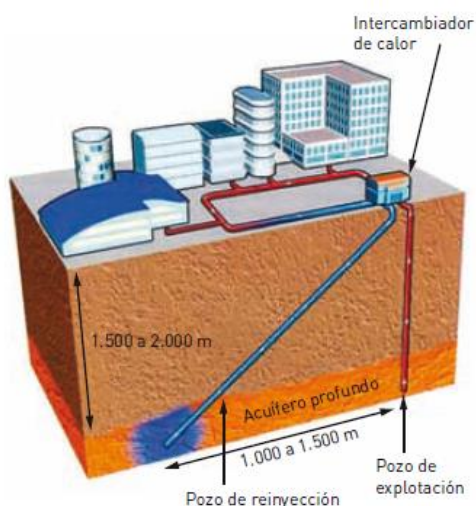
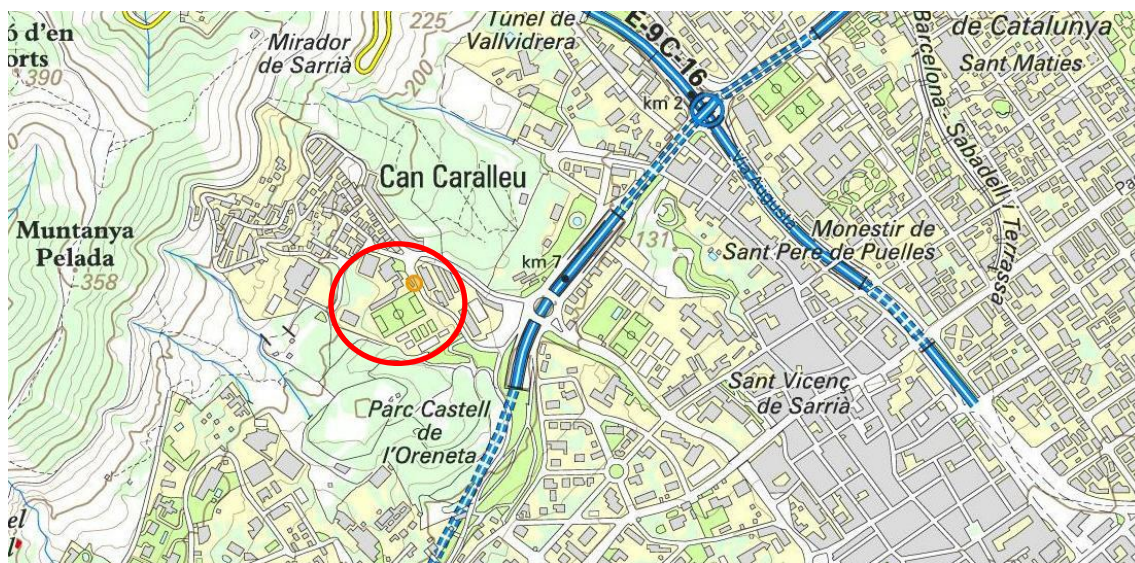


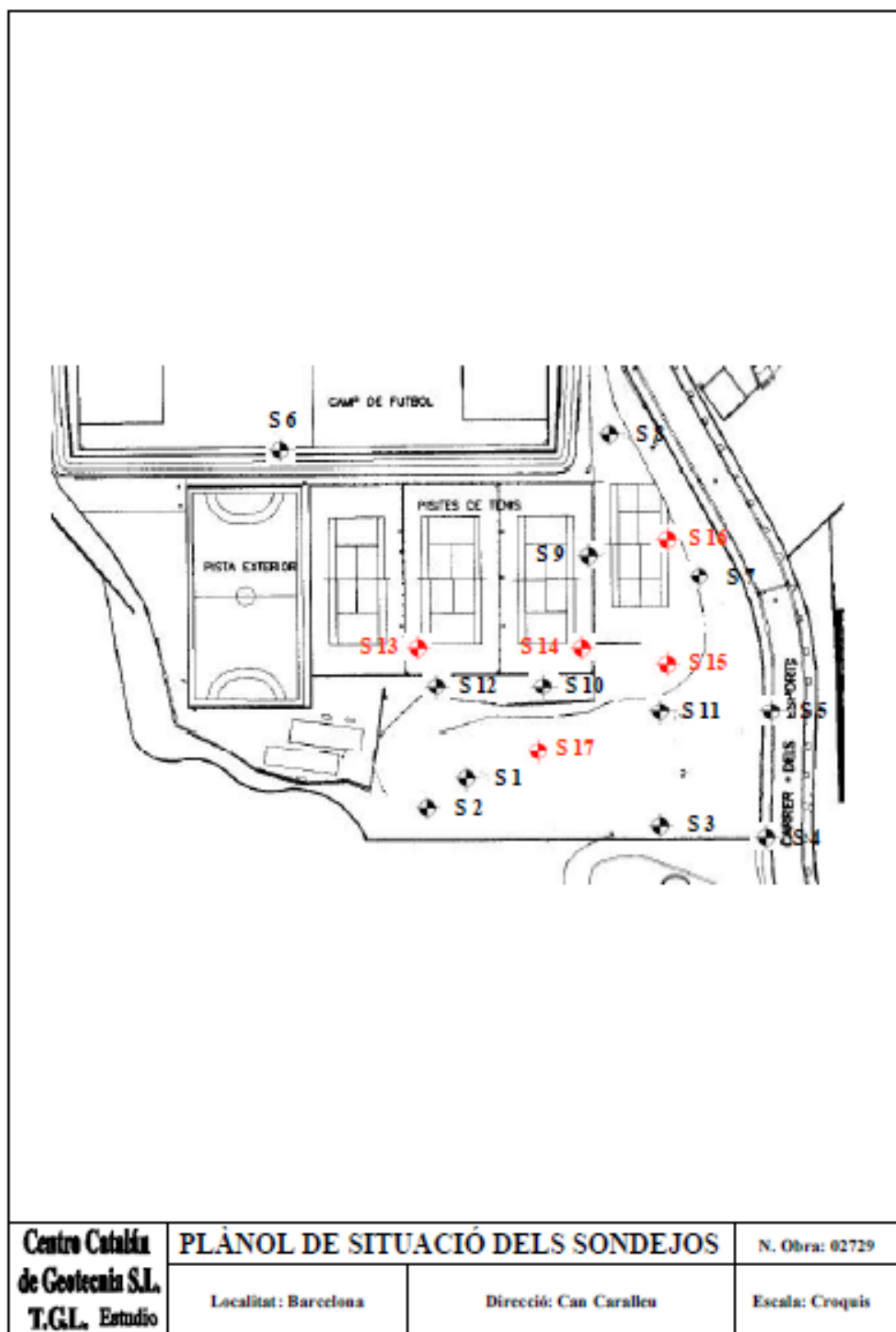
Figura 7.- Sistema d'explotació de jaciments profunds per a ús directe mitjançant sondejos dobles. Font: LLOPIS TRILLO, G.; RODRIGO ANGULO, V. Guía de la Energía Geotérmica. Comunidad de Madrid. 2008.

Annex 2: Mapa de situació general



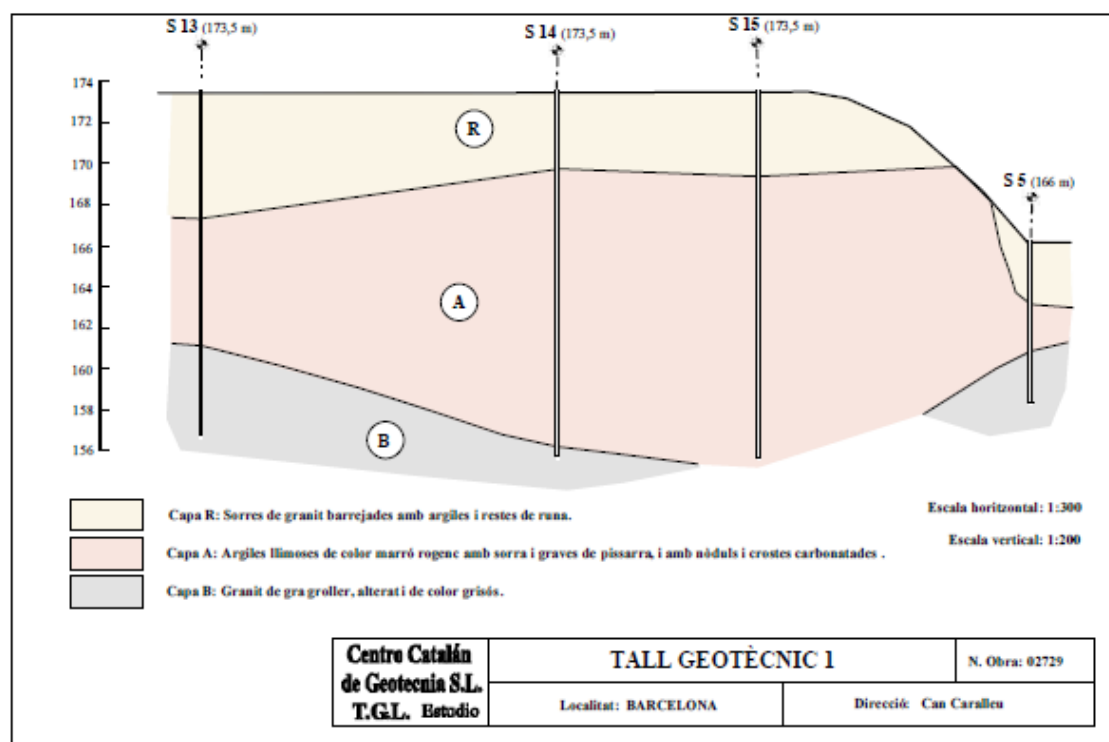
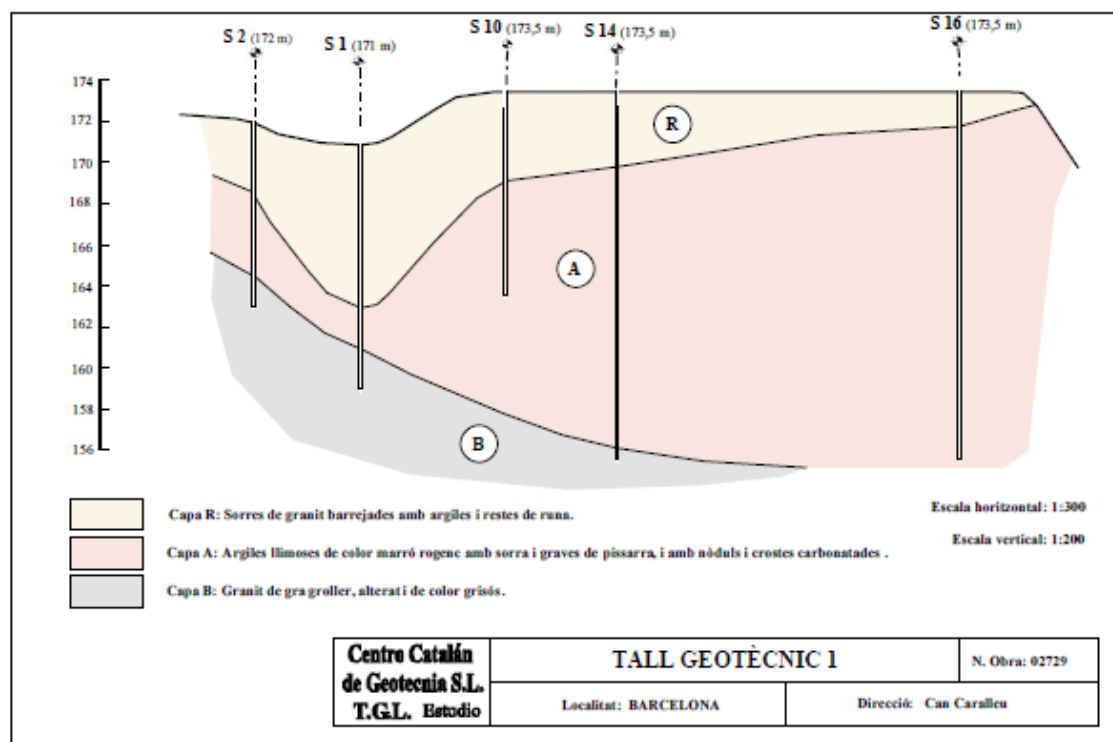
Mapa topogràfic 1:25.000 de la zona, on se senyala amb un cercle la situació del CEM Can Caralleu. Font: ICGC

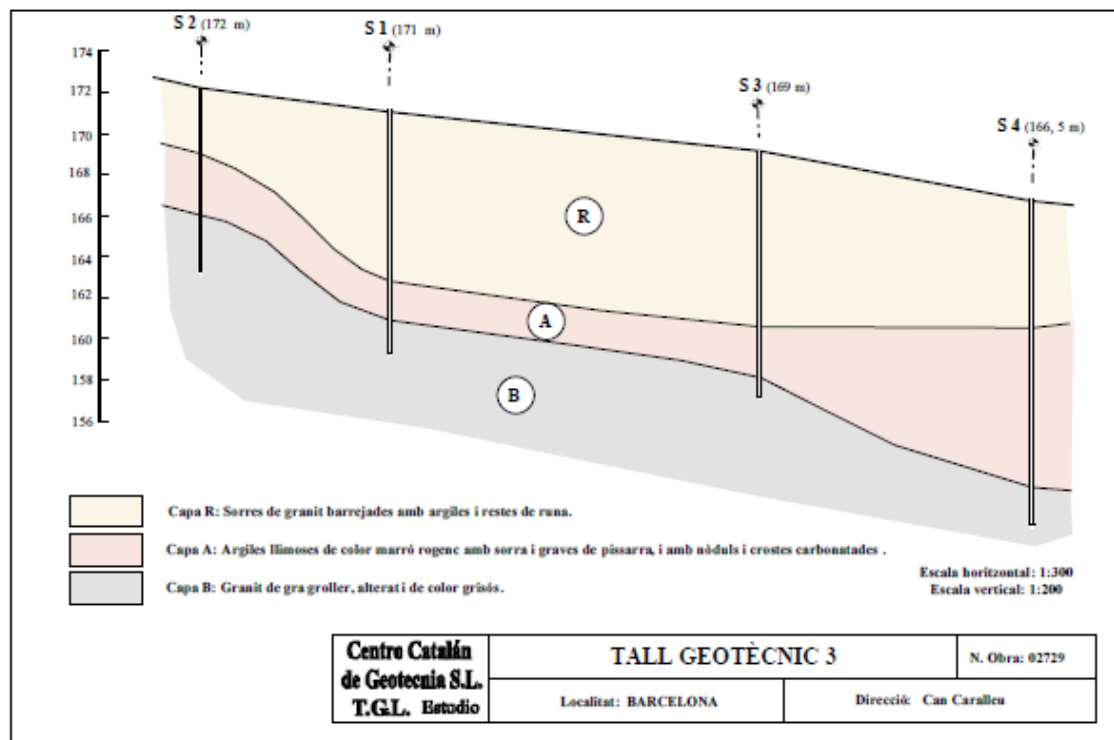
Annex 3: Plànol de situació dels sondejos



Font: MATAS, S. Projecte d'execució del poliesportiu municipal Can Caralleu al c/.Esports 2-8, Barcelona. Annex 2. Estudis geotècnics. (2003).

Annex 4: Talls geotècnics





Font: MATAS, S. Projecte d'execució del poliesportiu municipal Can Caralleu al c/.Esports 2-8, Barcelona. Annex 2. Estudis geotècnics. (2003).